

مقاله پژوهشی

بررسی اثر تراکم و بافت خاک بر دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه تتاپروب

حمزه علی‌علیزاده^{۱*}، مجید نوری محمدیه^۲ و عبدالمجید لیاقت^۳

چکیده

یکی از روش‌های نسبتاً جدید برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده از دستگاه تتاپروب است. از مزایای این روش اندازه‌گیری سریع، دقت بالا، اندازه‌گیری مستقیم در صحرا و در شرایط طبیعی و قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک از حد رطوبت پژمردگی تا رطوبت اشباع است. در این تحقیق برای بررسی اثر تراکم و بافت خاک بر دقت دستگاه تتاپروب، سه نوع خاک با بافت‌های شنی، لومی و رسی انتخاب گردید. سپس از هر نوع خاک ۱۷ نمونه با تراکم‌های متفاوت برداشت شد. نمونه‌ها طوری انتخاب شدند که دامنه رطوبتی آنها بین خاک خشک شده در مجاورت هوای آزاد و رطوبت اشباع باشد. سپس دستگاه را با دو روش خطی و غیر خطی کالیبره کرده و مقادیر اندازه‌گیری شده با روش وزنی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که دستگاه در خاک‌های شنی دارای بیشترین دقت (میانگین قدرمطلق خطاها ۰/۲۷٪) بوده و با افزایش میزان رس خاک از دقت دستگاه کاسته می‌شود. اثر تراکم خاک بر دقت اندازه‌گیری دستگاه در خاک‌های شنی ناچیز بوده و با سنگین‌تر شدن بافت خاک، میزان تاثیر تراکم خاک بر دقت دستگاه افزایش نشان داد. رسم نمودار همسانی بین نتایج روش تتاپروب و روش وزنی نشان داد که بیشترین و کمترین همسانی بین دو روش به ترتیب در خاک‌های شنی و رسی ($R^2=0/95$ و $R^2=0/91$) بوده و در خاک‌های لومی همسانی متوسط ($R^2=0/93$) بوده است.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری رطوبت، تراکم خاک، تتاپروب، روش وزنی.

ارجاع: علیزاده ح.ع، نوری محمدیه م و لیاقت ع. 1388. بررسی اثر تراکم و بافت خاک بر دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه تتاپروب. مجله پژوهش آب ایران. 3 (4) 19-29.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

^۳ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی علوم آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

*نویسنده مسئول: hamzeh_bil@yahoo.com

مقدمه

استفاده از روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک بر اساس خصوصیات غیرعادی آب از نظر ثابت دی الکتریک (ضریب یونیزاسیون بسیار کم) مانند روش انعکاس سنجی زمانی (TDR) و تناپروب از زمانی که تاپ و همکاران (۱۹۸۰) امکان اجرای عملی آن را بررسی و ارائه کردند به شدت توسعه یافته است. مفاهیم پایه در مورد روش TDR و روش‌های اصلاحی آن، رفتار دی الکتریک خاک است. ثابت دی الکتریک آب ۸۱، ذرات خاک ۳ تا ۵ (به طور متوسط ۴) و هوا، ۱ است. بنابراین تفاوت آب با سایر اجزا سازنده خاک (ذرات جامد، معدنی یا آلی، هوا و غیره) در خاصیت دی الکتریک آن نمایان می‌شود. این حقیقت واضح مانند اثر انگشت باعث تشخیص مقدار آب در محیط متخلخلی که در میدان الکتریکی قرار گرفته می‌شود. به طوریکه ثابت دی الکتریک بالای خاک نشان دهنده رطوبت بیشتر خاک است. اگر چه روش‌های مبتنی بر ثابت دی الکتریک (مانند TDR و T-Probe) به علت سرعت، دقت و اندازه‌گیری رطوبت در شرایط مزرعه (خاک دست نخورده) روز به روز در حال گسترش هستند. ولی به علت حساسیت شدید این روش‌ها به ثابت دی الکتریک، دستیابی به مزایای فوق همواره و برای همه شرایط امکان‌پذیر نیست. زیرا ثابت دی الکتریک علاوه بر میزان آب خاک به مقدار الکترولیت‌های محلول و میزان رس خاک بستگی دارد (لیاقت و همکاران، ۱۹۹۸). در سال‌های اخیر مقالات مروری جامعی در مورد TDR تهیه شده و به صورت کاربردی منتشر شده است (تاپ و همکاران، ۲۰۰۳؛ رابینسون و همکاران، ۲۰۰۳). در طول دوره تکامل این روش انتقادات زیادی در مورد کاربرد و اعتبار این روش به وجود آمد که محققان (روت و همکاران، ۱۹۹۰؛ داسبرگ و هایمن، ۱۹۹۲؛ جاکوبسن و اسکجونینگ، ۱۹۹۳؛ دایرکسن و داسبرگ، ۱۹۹۳؛ والی، ۱۹۹۳؛ پونیزووسکی و همکاران، ۱۹۹۹؛ رابینسون و همکاران، ۱۹۹۹، ۲۰۰۲) را به بررسی اثر رطوبت، بافت خاک، سطح ویژه ذرات، دانسیته خشک، مقدار ماده آلی، مقدار رس، املاح، یخ و آب محبوس شده، فرکانس وسیله، طول کابل، دما و ... بر ثابت دی الکتریک سوق داد. به طور کلی شماری از مقالات تحقیقاتی کاربردی (تاپ و همکاران، ۱۹۸۰؛ روت و همکاران، ۱۹۹۲؛ جاکوبسن و شجونینگ، ۱۹۹۳؛ یوشیکاوا

و همکاران، ۲۰۰۴) بر موضوع کالیبره کردن و اعتبار و دقت نتایج بدست آمده متمرکز شدند. روت و همکاران (۱۹۹۰) منحنی کالیبراسیونی ارائه دادند که بر مدل دی الکتریک مخلوط چهار جزئی دایسون و همکاران (۱۹۸۵) استوار بود. نظریه مدل دی الکتریک مخلوط از لاندائو و لیفشیتز (۱۹۶۰) سرچشمه گرفته است که رفتار دی الکتریک مخلوطی از دی الکتریک‌ها را بیان می‌کند. این مدل به سرعت در علوم خاک مورد کاربرد قرار گرفت. خاک مخلوطی از ذرات جامد، هوا و آب است. که ثابت دی الکتریک موثر ϵ^α آن را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$\epsilon^\alpha = \sum f_i \epsilon_i \alpha \quad (1)$$

که در آن f_i حجم شکستگی‌ها و ϵ_i ثابت دی الکتریک جزء i ام خاک و α پارامتر تطابق نامیده می‌شود (والی، ۱۹۹۳). مثلاً اگر $\alpha = 0.5$ باشد رابطه (۱) به صورت خطی $\sqrt{\epsilon^\alpha} = f(\theta)$ تبدیل می‌شود:

$$\sqrt{\epsilon} = \theta(\sqrt{\epsilon_w} - 1) + \frac{\rho_b}{\rho_s}(\sqrt{\epsilon_s} - 1) + 1 \quad (2)$$

در این رابطه ρ_b چگالی خشک، ϵ_w ثابت دی الکتریک آب (۸۱) و ϵ_s ثابت دی الکتریک ذرات جامد (۳ تا ۵) است. دایرکسن و داسبرگ (۱۹۹۳) تلاش کردند تا فرمول کالیبره کردن تاپ و همکاران را با مدل دی الکتریک مخلوط مکسول-دلور (دلور، ۱۹۶۸) و همچنین با یک مدل مخلوط چهار جزئی تجربی مقایسه کنند که فاکتور وابسته به شکل α (توان) به عنوان پارامتر انطباق دهنده استفاده می‌شده است. علی‌رغم شایستگی، کاربرد روش‌های دی الکتریک مخلوط به خاطر نیاز به داده‌های ورودی زیاد و وابستگی به اجزاء سازنده و ساختمانی خاک محدود شده است. روت و همکاران (۱۹۹۲) تلاش کردند تا رفتار دی الکتریک و خواص مغناطیسی مشهود خاک را در تحقیقات خود وارد کنند. هر چند که آنها به دنبال تدوین فرمول واحدی برای کالیبره کردن خاکهای معدنی و آلی بودند لیکن نتایج تحقیقات آنها نشان داد که فرمول کالیبره واحدی برای خاکهای معدنی و رابطه کالیبراسیون متمایز دیگری برای خاکهای آلی وجود دارد. رابطه کالیبراسیون آنها یک چند جمله‌ای درجه سه است که رطوبت حجمی (θ_v) را بر حسب ثابت دی-

انتخاب شد. جدول ۲ موقعیت و بافت خاک هر کدام از مزارع مربوطه را بر اساس سیستم طبقه بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) و استفاده از مثلث بافت خاک نشان می‌دهد. سپس از هر یک از این مزارع ۱۷ نمونه خاک با تراکم‌های متفاوت برداشت شد. استوانه‌های نمونه برداری با توجه به هدف آزمایش از جنس پلکسی گلاس با قطر و ارتفاع تقریبی به ترتیب ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد و سپس با مشبک کردن انتهای این استوانه‌ها (ایجاد زهکش) از پایین نمونه‌ها اشباع می‌شد. برای جلوگیری از خطای حاصل از ایجاد پاکت‌های هوا در اثر تعدد نصب دستگاه، همه نمونه‌های برداشتی اشباع شد و سپس اجازه داده شد تا نمونه‌ها در آزمایشگاه و به طور طبیعی از طریق زهکشی و تبخیر به حد رطوبتی دلخواه برسند. سپس با دقت سنجنده تتاپروب را به صورت عمودی وارد ستون خاک کرده و بعد از قرائت ولتاژ با استفاده از سیلندرهای فولادی به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر از خاک داخل استوانه یک نمونه برداشت شده و رطوبت وزنی آن تعیین شد. انجام آزمایش به این طریق علاوه بر حذف خطای حاصل از ایجاد پاکت‌های هوا باعث حذف خطای حاصل از تأثیر جداره ظرف بر روی امواج الکتریکی (به علت بزرگی قطر استوانه‌ها (۱۵ سانتی‌متر) می‌شود.

جدول ۱- مشخصات و موقعیت خاک‌های مورد آزمایش

بافت خاک	درصد درصد شن	درصد رس	موقعیت مزرعه
شنی	۱۱	۸۲	ساخته شده در آزمایشگاه
لومی	۳۹	۴۸	مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران
رسی	۲۵	۴۳	مزرعه باغ سیب دانشگاه تهران

معرفی دستگاه تتاپروب ML2

تتاپروب یکی از وسایل اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک است، که بر پایه تغییرات ثابت دی‌الکتریک استوار است. این تغییرات قابل تبدیل به ولتاژ و رطوبت حجمی هستند. دستگاه تتاپروب از ۴ میله هم‌اندازه به طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۳ میلی‌متر، یک محفظه ضد آب (بدنه پروب) و کابلی که سیگنال‌های ورودی و خروجی را به صفحه نمایش دهنده داده‌ها وصل می‌کند تشکیل شده است. سیگنال‌های تولید شده توسط دستگاه دارای فرکانس‌های ارسالی ۱۰۰ مگاهرتز

الکتریک (E) بیان می‌کند. همچنین نتیجه تحقیقات آنها نشان داد که توابع کالیبراسیون برای خاک‌های معدنی دقیقاً از روابط ارائه شده توسط تاپ و همکاران (۱۹۸۰) و مالیکی و اسکیروکا (۱۹۸۹) تبعیت می‌کند و آنها همچنین نشان دادند که ثابت دی‌الکتریک خاک‌های آلی در رطوبت‌های یکسان کمتر از خاک‌های معدنی است که این موضوع به اختلاف در چگالی حجمی نسبت داده می‌شود. جکسون و اسکجونینگ (۱۹۹۳) از ۱۸۹ نمونه که در انواع مختلف از خاک‌های شنی درشت تا خاک‌های لومی رسی که چگالی مخصوص ظاهری آنها بین ۱/۳۵ تا ۱/۵۵ گرم بر سانتیمتر مکعب متغیر بود استفاده کردند و تلاش کردند تا روشی برای کالیبره کردن TDR ابداع کنند. یافته‌های آنها به ارائه یک چند جمله‌ای درجه سه انجامید که نتایجی متفاوت از روابط قبلی ارائه می‌داد. بخشی از این انحرافات را می‌توان بوسیله تفاوت در بافت خاک شرح داد. در نظر گرفتن عباراتی نظیر روابط خطی برای چگالی خشک، محتوای رس، و مقدار مواد آلی در رابطه کالیبراسیون هر کدام باعث بهتر شدن رابطه شده است. بدون شک مقالات تحقیقاتی زیادی به مسئله تعیین رطوبت بوسیله روش TDR پرداخته‌اند. مسئله ارزیابی و استفاده از وسیله تتاپروب (نوع ML2) به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است و شمار محدودی از مقالات به بررسی در زمینه وسایل تعیین کننده الکترومغناطیسی مانند تتاپروب پرداخته‌اند (لوکانو و ساواگ، ۲۰۰۶؛ یوشیکاوا و همکاران، ۲۰۰۴؛ رابینسون و همکاران، ۱۹۹۹). نتایج تحقیقات کارگاس و کرکیدز (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که منحنی‌های کالیبراسیونی که سازندگان دستگاه ارائه کرده‌اند در بیشتر موارد از حدود پیش‌بینی شده برای رطوبت منحرف شده و کالیبراسیون خاص برای هر خاک ضروری است این کار در اغلب موارد باعث بهبود نتایج می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی اثرات تراکم و بافت خاک بردقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه تتاپروب است.

مواد و روش‌ها

مشخصات خاک‌های مورد آزمایش و چگونگی انجام کار

برای انجام این آزمایش سه نوع خاک زراعی با بافت‌های شنی، لومی و رسی از مزارع کشاورزی شهرستان کرج

کالیبره کردن دستگاه با روابط بالا نیاز به تعیین دو پارامتر α_0 و α_1 در رابطه (۳) دارد. مقادیر پارامترهای α_0 و α_1 توسط سازنده برای خاکهای غیر آلی بترتیب $1/3$ و $1/4$ ، برای خاکهای آلی بترتیب $1/3$ و $1/7$ ارائه شده است. با استفاده از این مقادیر در گام اول می‌توان رطوبت را برای خاک‌های معدنی و آلی به ترتیب با استفاده از روابط (۶) و (۷) بدست آورد.

$$\theta = -0.190 + 0.119\sqrt{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\theta = -0.168 + 0.13\sqrt{\varepsilon} \quad (7)$$

نکته ضروری در مورد استفاده از دستگاه تتاپروب این است که هنگام اندازه‌گیری، میله‌ها باید کاملاً به وسیله خاک پوشیده شوند (تمام ۶ سانتیمتر). در غیر این صورت مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده بسیار کمتر از مقدار واقعی خواهد شد. یکی از نقطه ضعف‌های دستگاه تتاپروب این است که اگر هنگام نصب دستگاه در خاکهای رسی خشک دقت لازم مبذول نشود میله‌ها به راحتی کج و در نهایت می‌شکنند. تتاپروب به محتوای آب نگه داشته شده در اطراف میله‌ها حساس است اما این حساسیت در اطراف میله مرکزی بسیار بیشتر است. تجمع حباب‌های هوا (هنگام نصب) اطراف میله‌ها بخصوص میله مرکزی باعث می‌شود که دستگاه رطوبت خاک را کمتر از مقدار واقعی نشان دهد. بنابراین هنگام نصب دستگاه در خاک باید خیلی دقت کرد.

کالیبراسیون دستگاه

جدول ۲ توابع کالیبراسیون مختلفی که برای ارزیابی در این مقاله استفاده شده است را نشان می‌دهد.

هستند که به وسیله یک خط انتقال استوانه‌ای و از طریق چهار میله به خاک انتقال داده می‌شوند. وقتی این سیگنال‌ها وارد خاک می‌شوند محتوای دی‌الکتریک و هدایت یونی خاک از جمله مقاومت‌هایی هستند که در سر راه آنها قرار می‌گیرند. از طرف دیگر به علت حداقل بودن هدایت یونی در ۱۰۰ مگاهرتز تنها مقاومت موجود در سر راه سیگنال‌های ارسالی محتوای دی‌الکتریک است. همچنین بالا بودن ثابت دی‌الکتریک آب (۸۱) و اختلاف آن با ثابت دی‌الکتریک خاک و هوا (۴ و ۱)، باعث حساسیت دستگاه به محتوای آب محیط متخلخل شده است. اگر بین مقاومت میله‌ها و مقاومت خطوط انتقال درونی پروب تفاوت ایجاد شود بخشی از سیگنال‌های ایجاد شده توسط دستگاه از محل اتصال میله‌های پروب از بدنه به داخل دستگاه باز می‌شود. سیگنال‌های بازگشتی و ساطع شده باعث ایجاد اختلاف پتانسیل ثابتی در خط انتقال می‌شوند. تغییرات ولتاژ توسط صفحه نمایش دهنده داده‌ها ثبت می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ مقاومت مربوطه می‌توان از طریق روابط زیر ثابت دی‌الکتریک و مقدار رطوبت حجمی را تعیین کرد. رابطه بین θ_v و $\sqrt{\varepsilon}$ توسط میلر و گاسکین (۱۹۹۷) به صورت زیر ارائه شده است.

$$q_v = \frac{(\sqrt{e} - a_0)}{a_1} \quad (3)$$

همچنین رابطه بین ولتاژ خروجی سنجنده V و ریشه دوم ثابت دی‌الکتریک $\sqrt{\varepsilon}$ به صورت زیر ارائه شده است.

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.07 + 6.4\sqrt{V} - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (4)$$

و یا برای اهداف عملی با رابطه خطی.

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.1 + 4.44V \quad (5)$$

جدول ۲- توابع کالیبراسیون ارائه شده برای خاک‌های معدنی

منبع	توابع	
سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	$\theta = -0.19 + 0.119\sqrt{\varepsilon}$	۱ روش خطی
سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	$\theta = -0.168 + 0.13\sqrt{\varepsilon}$	۲ روش غیر خطی
تاپ و همکاران (۱۹۸۰)	$\theta = -0.053 + 0.0292\varepsilon - 0.00055\varepsilon^2 + 0.0000073\varepsilon^3$	۳
روت و همکاران (۱۹۹۲)	$\theta = -0.0728 + 0.0448\varepsilon - 0.00195\varepsilon^2 + 0.0000361\varepsilon^3$	۴
جاکوبسن و همکاران (۱۹۹۳)	$\theta = -0.0701 + 0.0347\varepsilon - 0.00116\varepsilon^2 + 0.000018\varepsilon^3$	۵

کالیبراسیون ویژه

رابطه (۳) را می‌توان به صورت زیر تبدیل کرد:

$$\sqrt{\varepsilon} = \alpha_0 + \alpha_1 \times \theta \quad (8)$$

برای کالیبره کردن دستگاه تناپروب با این فرمول ابتدا یک نمونه خاک مرطوب انتخاب و با نصب دستگاه تناپروب ولتاژ (V_w) سیگنال‌های ورودی به دستگاه قرائت شده و $\sqrt{\varepsilon_w}$ با استفاده از روابط ۴ یا ۵ محاسبه می‌شود. سپس نمونه خاک را در آن گذاشته و در دمای ۱۰۵ درجه خشک کرده و ضمن محاسبه رطوبت حجمی نمونه (θ_w) با نصب دستگاه در خاک خشک ولتاژ ورودی قرائت می‌شود و با استفاده از روابط (۴) یا (۵) $\sqrt{\varepsilon}$ بدست می‌آید. در مرحله بعد با جایگزینی $\theta = 0$ در رابطه (۸) $\alpha_0 = \sqrt{\varepsilon}$ از روی نمونه خاک کاملاً خشک بدست می‌آید. در نهایت با جایگذاری $\sqrt{\varepsilon_w}$ و θ_w در رابطه (۸) α_1 محاسبه می‌شود.

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\theta_w} \quad (9)$$

در نهایت با مشخص شدن α_0 و α_1 ، از تلفیق رابطه (۹) در رابطه (۴) یا (۵) می‌توان رطوبت کالیبره شده را برای هر نقطه رطوبتی بدست آورد.

$$\theta = \frac{[1.1 + 4.44V] - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{[1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3] - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (11)$$

رابطه (۱۰) برای حالت خطی و رابطه (۱۱) برای حالت غیر خطی است. در این تحقیق برای بیان همسانی مدل‌های تخمین رطوبت با روش مستقیم اندازه‌گیری از ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) مطابق رابطه زیر استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\theta_p - \theta)^2}{m}} \quad (12)$$

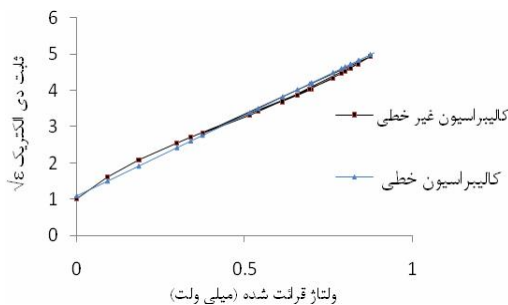
که در این رابطه θ مقدار اندازه‌گیری شده رطوبت به روش وزنی، θ_p مقدار پیش بینی شده طبق روابط مختلف کالیبراسیون و m تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش ابتدا خصوصیات اندازه‌گیری و محاسبه شده در خاک‌های معمولی و سپس نتایج مربوط به خاک‌های متراکم ارائه می‌شود.

الف- خاک معمولی

رابطه بین ولتاژ سیگنال‌های ورودی و ریشه دوم محتوای دی الکتریک خاک با دو روش کالیبراسیون خطی و غیر خطی (ویژه) در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۳ مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطاها برای مدل‌های مختلف و خاک‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار ریشه دوم ثابت دی الکتریک بر حسب ولتاژ سیگنال‌های ورودی

جدول ۳- مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطاها برای

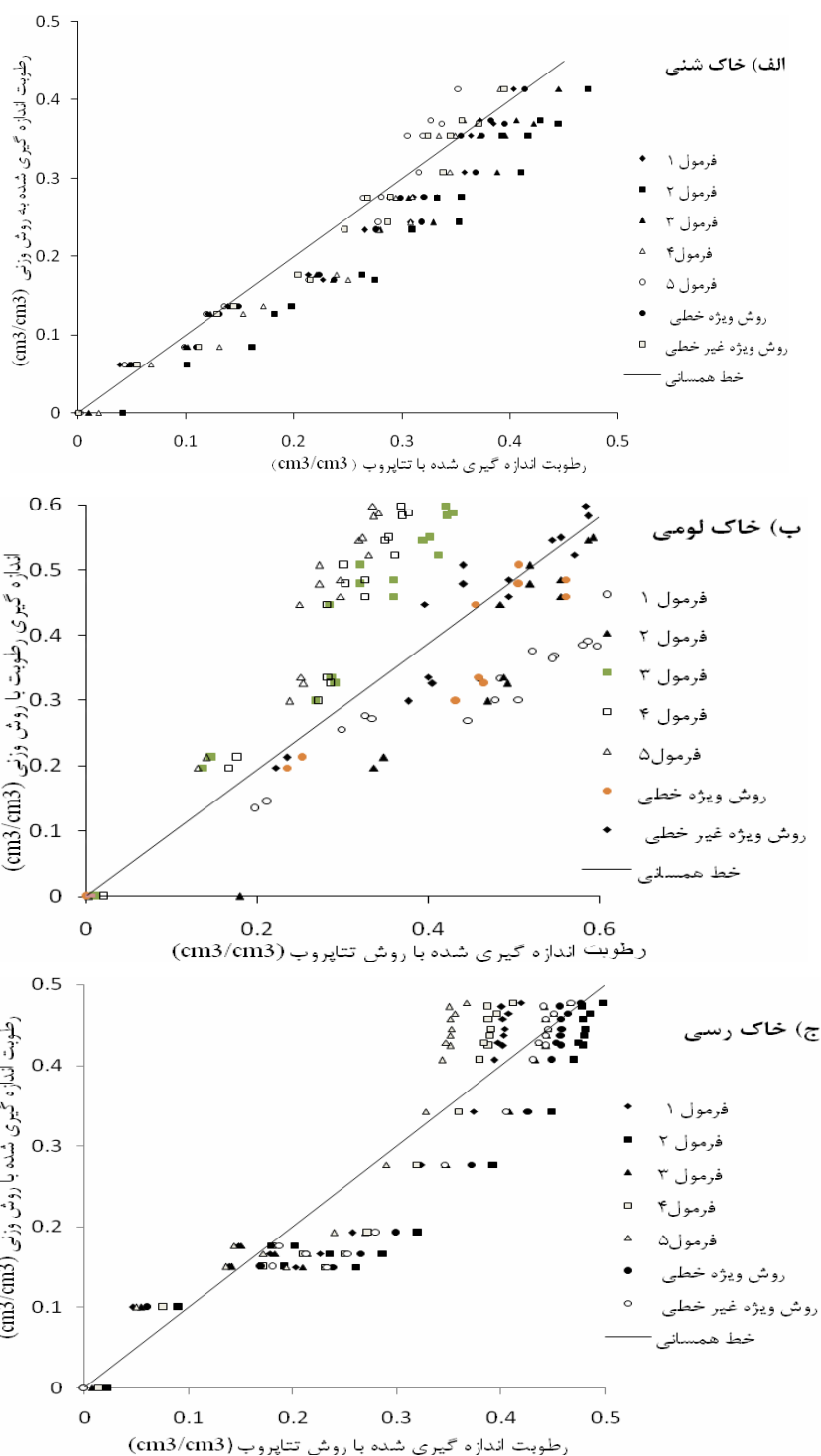
مدل‌های مختلف و خاک‌های متفاوت

RMSE			روش کالیبراسیون
خاک شنی	خاک رسی	خاک لومی	
۰/۰۳۶	۰/۰۵۲	۰/۰۷۸	ویژه خطی
۰/۰۲۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۲	ویژه غیرخطی
۰/۰۳	۰/۰۴۳	۰/۱۴۷	سازندگان دستگاه (خطی)
۰/۰۷۲	۰/۰۷	۰/۱۰۳	سازندگان دستگاه (غیر خطی)
۰/۰۴۴	۰/۰۳۸	۰/۱۲۵	تاپ و همکاران
۰/۰۳۸	۰/۰۵۵	۰/۱۵۲	روت و همکاران
۰/۰۳	۰/۰۷۰	۰/۱۷۹	جاکوبسن و همکاران

با توجه به جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد در بافت‌های شنی و لومی مدل کالیبراسیون ویژه غیرخطی (سازندگان دستگاه، ۱۹۹۹) و در بافت رسی مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) بهترین برازش را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. این نتیجه با نتایج کارگاس و کرکیدز (۲۰۰۸) مطابقت دارد.

۳، ۴ و ۵ معرف مدل استاندارد سازندگان (۱۹۹۹) در حالت خطی، مدل استاندارد سازندگان (۱۹۹۹) در حالت غیر خطی، مدل تاپ و رینولدز (۱۹۸۰)، مدل روت و همکاران (۱۹۹۲) و مدل جاکوبسن و شجونینگ (۱۹۹۳) است.

شکل ۲ انحراف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با روش تناپروب در خاک‌های مختلف (شکل الف- خاک شنی، ب- خاک لومی و ج- خاک رسی) را از مقادیر مشاهده‌ای (روش وزنی) نشان می‌دهد. در این شکل‌ها به ترتیب فرمول ۱، ۲،



شکل ۲- مقایسه مقادیر تخمین زده شده θ برای مدل‌های مختلف در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن در (الف) خاک شنی (ب) خاک لومی و (ج) خاک رسی

ب- خاک متراکم

همکاران (۱۹۸۰) ساده شود رابطه خطی زیر بدست می‌آید که بسیار شبیه فرمول سازندگان (فرمول ۲) دستگاه است.

$$\theta = -0.176 + 0.115\sqrt{\varepsilon} \quad (۱۳)$$

همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که مدل جاکوبسن و همکاران (۱۹۹۳) در رطوبت‌های بالا (بالتر از ظرفیت زراعی) مقدار رطوبت را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و در رطوبت‌های پایین‌تر مقدار رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد؛ مدل روت و همکاران (۱۹۹۲) در اکثر موارد مقدار رطوبت را بیشتر (به استثنای رطوبت‌های نزدیک اشباع) از مقدار واقعی نشان می‌دهد. در کل به نظر می‌رسد سنسور ML2 با استفاده از رابطه سازنده در اکثر خاک‌ها (به استثنای خاک‌های شنی) مقدار رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. این نتیجه با نتایج رابینسون و همکاران (۱۹۹۹) و کاش و همکاران (۲۰۰۵) مشابهت دارد.

در این آزمایش معیار تراکم خاک تغییرات جرم مخصوص ظاهری بود. جداول ۴ تا ۶ رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه-گیری شده را برای خاک‌های معمولی (جرم مخصوص در حالت استاندارد) و متراکم (با جرم مخصوص ثانویه) در بافت‌های مختلف نشان می‌دهند. مطابق شکل ۲ و جداول ۳ تا ۶ روابط پیشنهادی توسط سازندگان دستگاه، رطوبت را در خاک‌های لومی و رسی بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند (جدول ۶). اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه-گیری شده در برخی حالات بیشتر از $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ است که به عنوان خطای حاصل از محدودیت پیش‌بینی θ در نظر گرفته می‌شود (میلر و گاسکین، ۱۹۹۷). همچنین نتایج نشان می‌دهد که شباهت زیادی بین مقادیر پیش‌بینی شده از مدل سازندگان دستگاه و روش تاپ و همکاران (۱۹۸۰) وجود دارد. علت این مطابقت آن است که اگر رابطه تاپ و

جدول ۴- رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در دو حالت معمولی و متراکم در خاک‌های رسی

نمونه	خاک معمولی		خاک متراکم	
	وزن مخصوص (gr/cm^3)	رطوبت (cm^3/cm^3)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	رطوبت (cm^3/cm^3)
۱	۱/۳۳	۰/۴۸	۱/۳۳	۰/۴۷
۲	۱/۳۰	۰/۴۶	۱/۳۰	۰/۴۵
۳	۱/۳۲	۰/۴۵	۱/۳۹	۰/۴۷
۴	۱/۲۹	۰/۴۴	۱/۴۱	۰/۴۸
۵	۱/۳۶	۰/۴۲	۱/۴۵	۰/۴۷
۶	۱/۲۹	۰/۴۶	۱/۳۸	۰/۴۷
۷	۱/۳۳	۰/۴۷	۱/۳۳	۰/۴۹
۸	۱/۳۱	۰/۴۳	۱/۴۲	۰/۴۹
۹	۱/۲۷	۰/۴۱	۱/۴۱	۰/۴۸
۱۰	۱/۲۷	۰/۳۴	۱/۵۱	۰/۴۳
۱۱	۱/۳۲	۰/۲۸	۱/۴۹	۰/۳۳
۱۲	۱/۳۰	۰/۱۹	۱/۴۸	۰/۲۳
۱۳	۱/۳۱	۰/۱۷	۱/۵۲	۰/۲۰
۱۴	۱/۳۲	۰/۱۷	۱/۴۰	۰/۱۹
۱۵	۱/۳۰	۰/۱۵	۱/۳۹	۰/۱۷
۱۶	۱/۳۰	۰/۱۵	۱/۴۱	۰/۱۷
۱۷	۱/۲۹	۰/۱۸	۱/۳۵	۰/۱۹
۱۸	۱/۳۲	۰/۱۰	۱/۳۷	۰/۱۱
۱۹	۱/۳۳	۰/۰۰	۱/۳۵	۰/۰۰
RMSE		۰/۰۴۵		۰/۰۶۷

جدول ۵- رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در دو حالت معمولی و متراکم در خاک‌های شنی

نمونه	خاک معمولی			خاک متراکم		
	وزن مخصوص	رطوبت (cm^3/cm^3)	تناپروب	وزن مخصوص	رطوبت (cm^3/cm^3)	تناپروب
	(gr/cm^3)	وزنی		(gr/cm^3)	وزنی	
۱	۱/۴۵	۰/۳۷	۰/۳۶	۱/۴۵	۰/۴۲	۰/۳۹
۲	۱/۴۶	۰/۳۵	۰/۳۵	۱/۴۸	۰/۴۰	۰/۳۹
۳	۱/۳۷۱	۰/۳۷	۰/۳۷	۱/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۱
۴	۱/۴۳	۰/۲۳	۰/۲۵	۱/۶	۰/۲۹	۰/۳۱
۵	۱/۳۵	۰/۲۸	۰/۲۹	۱/۶۱	۰/۳۷	۰/۳۸
۶	۱/۴۱	۰/۲۷	۰/۲۷	۱/۷	۰/۳۷	۰/۳۶
۷	۱/۴۱	۰/۳۱	۰/۳۴	۱/۵	۰/۳۶	۰/۴۰
۸	۱/۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۱/۴	۰/۴۶	۰/۴۴
۹	۱/۴۵	۰/۱۴	۰/۱۴	۱/۶	۰/۱۷	۰/۱۸
۱۰	۱/۳۶	۰/۱۸	۰/۲۰	۱/۵۹	۰/۲۲	۰/۲۶
۱۱	۱/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۲	۱/۴۷	۰/۴۲	۰/۳۸
۱۲	۱/۴۹	۰/۱۷	۰/۲۱	۱/۵۴	۰/۲۰	۰/۲۵
۱۳	۱/۴۸	۰/۲۴	۰/۲۹	۱/۶۱	۰/۲۹	۰/۳۵
۱۴	۱/۴۷	۰/۱۳	۰/۱۳	۱/۵۳	۰/۱۵	۰/۱۵
۱۵	۱/۴۹	۰/۰۸	۰/۱۱	۱/۵۵	۰/۱۰	۰/۱۳
۱۶	۱/۴۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۱/۴۸	۰/۰۷	۰/۰۶
۱۷	۱/۴۷	.	.	۱/۵۵	.	.
RMSE		۰/۰۲۲			۰/۰۲۶	

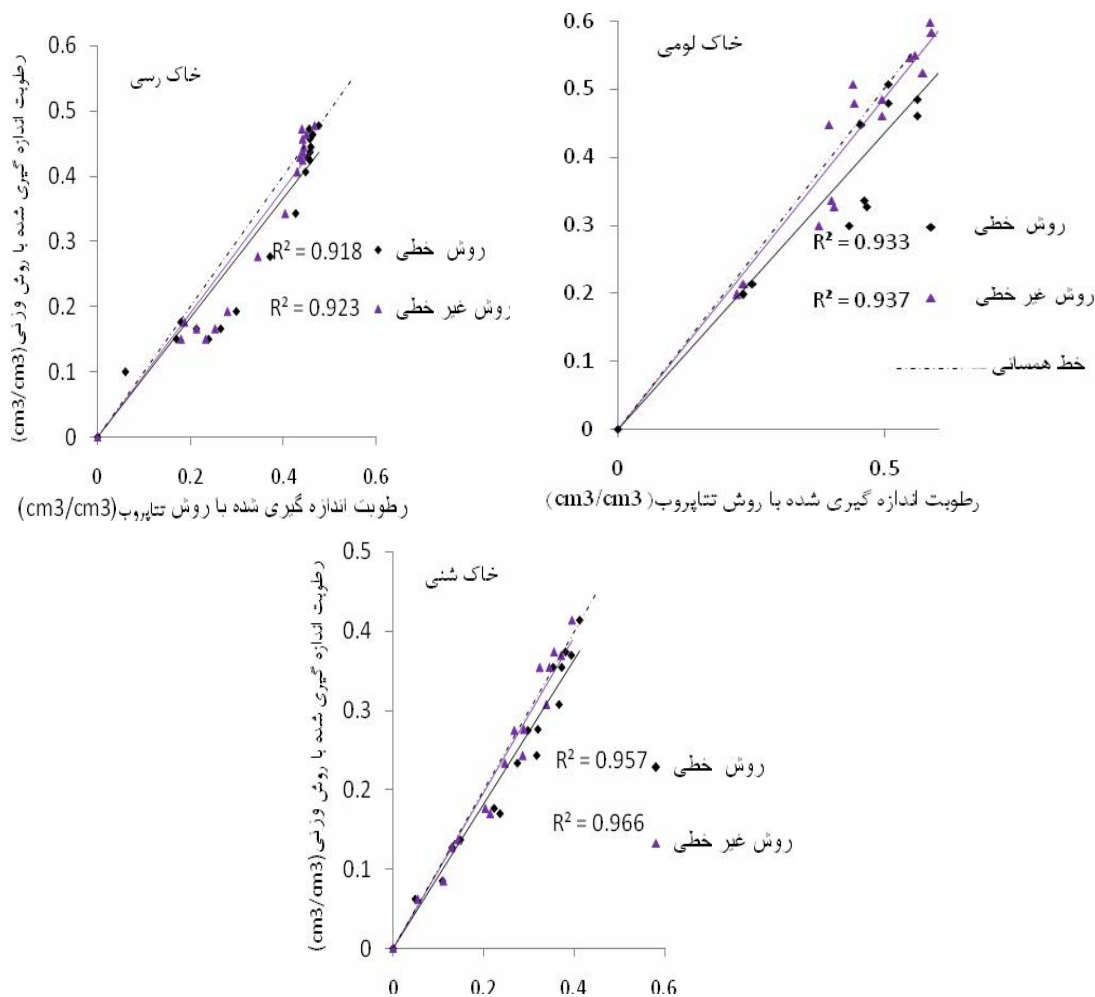
جدول ۶- رطوبت پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده در دو حالت معمولی و متراکم در خاک های لومی

نمونه	خاک معمولی			خاک متراکم		
	وزن مخصوص	رطوبت (cm^3/cm^3)	تناپروب	وزن مخصوص	رطوبت (cm^3/cm^3)	تناپروب
	(gr/cm^3)	وزنی		(gr/cm^3)	وزنی	
۱	۱/۳۷	۰/۵۹	۰/۶۰	۱/۴۰	۰/۶۰	۰/۶۲
۲	۱/۴۰	۰/۵۸	۰/۵۹	۱/۴۱	۰/۵۹	۰/۶۰
۳	۱/۴۰	۰/۶۰	۰/۵۸	۱/۴۰	۰/۶۰	۰/۵۸
۴	۱/۴۴	۰/۵۲	۰/۵۷	۱/۵۵	۰/۵۶	۰/۶۲
۵	۱/۴۰	۰/۵۵	۰/۵۶	۱/۴۵	۰/۵۷	۰/۵۹
۶	۱/۴۲	۰/۵۵	۰/۵۵	۱/۴۵	۰/۵۷	۰/۵۹
۷	۱/۳۱	۰/۴۶	۰/۴۹	۱/۵۸	۰/۵۵	۰/۶۰
۸	۱/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۹	۱/۶۹	۰/۵۸	۰/۵۹
۹	۱/۳۷	۰/۴۸	۰/۴۴	۱/۴۳	۰/۵۰	۰/۴۶
۱۰	۱/۳۰	۰/۵۱	۰/۴۴	۱/۴۴	۰/۵۶	۰/۴۹
۱۱	۱/۲۷	۰/۳۳	۰/۴۱	۱/۶۳	۰/۴۲	۰/۵۳
۱۲	۱/۳۹	۰/۳۴	۰/۴۰	۱/۴۷	۰/۳۶	۰/۴۳
۱۳	۱/۳۲	۰/۴۵	۰/۴۰	۱/۵۷	۰/۵۳	۰/۴۸
۱۴	۱/۳۸	۰/۳۰	۰/۳۸	۱/۴۹	۰/۳۲	۰/۴۱
۱۵	۱/۳۷	۰/۲۱	۰/۲۴	۱/۴۴	۰/۲۲	۰/۲۵
۱۶	۱/۳۰	۰/۲۰	۰/۲۲	۱/۳۷	۰/۲۱	۰/۲۳
۱۷	۱/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۳۵	.	۰/۰۰
RMSE		۰/۰۴۲			۰/۰۵۱	

برای تعیین همسانی بین دو روش وزنی و تتاپروب، مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با روش وزنی در مقابل روش تتاپروب رسم شد و سپس از ضریب تبیین (R^2) جهت نمایش تغییرات واریانس مقادیر تخمین زده شده رطوبت، نسبت به روش وزنی استفاده شد. شکل ۳ همسانی بین دو روش را در خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که در خاک‌های شنی کمترین و در خاک‌های رسی بیشترین انحراف از خط همسانی بین مقادیر تخمینی به وسیله مدل ویژه غیرخطی و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

جداول ۴ تا ۶ نشان می‌دهند که متراکم شدن خاک باعث افزایش انحراف مقادیر تخمینی از مقادیر واقعی می‌شود. این انحراف در خاک‌های رسی دارای بیشترین مقدار است ($RMSE=0.067$) برای خاک متراکم در مقابل ($RMSE=0.045$ برای خاک معمولی) با سبکتر شدن بافت خاک مقدار این انحراف کمتر می‌شود به طوری که در خاک‌های شنی این مقدار ناچیز است ($RMSE=0.026$) برای خاک متراکم در مقابل $RMSE=0.022$ برای خاک معمولی).

ج - همسانی بین دو روش



شکل ۳- نمایش همسانی بین روش تتاپروب و روش وزنی در خاک‌های مختلف

- including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology* 5: 147–157.
9. Landau L.D. and Lifshitz E.M. 1960. *Electromagnetic of Continuous Media*. Pergamon Press, Oxford.
 10. Liaghat. A.M. Bonnel R.B. and Broughton S. 1998. Effect of Clay Content and Bulk Electrical Conductivity on TDR Measurement of Water Content in the Soil. *Journal of ICIID* 47:37-44.
 11. Lukanu G. and Savage M.J. 2006. Calibration of frequency-domain reflectometry for determining soil water content in a clay loam soil. Available on website <http://www.wrc.org.za>.
 12. Malicki, M.A. and Skierucha W.M. 1989. A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science* 10: 153–163.
 13. Miller J.D. and Gaskin G. 1997. The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note.
 14. Ponizovsky A. Chudinova S. and Pachepsky Y. 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *J. of Hydrology* 218: 35–43.
 15. Robinson D.A. Gardner C.M.K. and Cooper J.D. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *J. of Hydrology* 223: 198–211.
 16. Robinson D.A., Cooper J.D. and Gardner C.M.K. 2002. Modeling the relative permittivity of soils using soil hydroscopic water content. *J. of Hydrology* 255: 39–49.
 17. Robinson D.A. Jones S.B. Wraith J.M. and Friedman S.P. 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2: 444–475.
 18. Roth C. Schulin R. Fluehler H. and Attinger W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurements using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26: 2267–2273.
 19. Roth C. Malicki M. and Plagge R. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science* 43: 1–13.
 20. Roth C.H. Malicki M.A. and Plagge R. 1993. Corrigenda. *Journal of Soil Science* 44: 49.
 21. Topp G. Davis J. and Annan A. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574–582.
- به طور کلی از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که کالیبراسیون مخصوص ضروری است زیرا در اغلب موارد دارای کمترین انحراف از مقادیر واقعی است. کالیبراسیون ارائه شده توسط سازندگان دستگاه در اغلب موارد از محدوده انحراف تعیین شده ($0/05\text{cm}^3/\text{cm}^3$) منحرف می‌شود. در خاک‌های رسی کالیبراسیون تاپ و همکاران (۱۹۸۰) عملکرد بهتری نسبت به روش کالیبراسیون مخصوص دارد ولی برای سایر بافت‌ها نتایج رضایت بخشی ارائه نمی‌دهد. رابطه روت و همکاران (۱۹۹۲) نتایج نادرستی برای همه خاک‌ها ارائه می‌دهد. صرف نظر از روش کالیبراسیون، دستگاه تناپروب در خاک‌های سبک بافت بهترین همسانی را با روش وزنی دارد.
- #### منابع
1. Cosh M.H. Jackson T.J. Bindlish, R. Famiglietti J.S. and Ryu D. 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. *Journal of Hydrology* 311: 49–58.
 2. Dobson M.C. Ulaby F.Y. Hallikainen M.T. and El-Rayes M.A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models. *Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing* GE-23: 35–46.
 3. Dasberg S and Hopmans J.W. 1992. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1341–1345.
 4. De Loor G.P. 1968. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. *J. Microwave Power*, 3:67-70.
 5. Dirksen C. and Dasberg S. 1993. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal* 57: 660–667.
 6. Gaskin G. and Miller J.D. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *J. of Agricultural Research* 63: 153–160.
 7. Kargas G. and Kerkides P. 2008. Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 Theta Probe. *J. of Irrig. and Drain*.
 8. Jacobsen O.J. and Schjonning P. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement

- measuring soil water content. *Journal of Soil Science* 44:1-9.
25. Yoshikawa K. Overduin P.P. and Harden J.W. 2004. Moisture content measurements of moss (*Sphagnum* spp.) using commercial sensors. *Permafrost and Periglacial Processes* 15: 309-
22. Topp G. Davis J. and Annan A. 2003. The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone Journal* 2:492-499.
23. Topp G.C. and Reynolds W.D. 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil and*